

**PATENT APPLICATION**

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

In re application of

Docket No: Q80898

Helmut HAIDNER, et al.

Appln. No.: 10/816,896

Group Art Unit: 2877

Confirmation No.: 2639

Examiner: Not Yet Assigned

Filed: April 2, 2004

For: **DEVICE AND METHOD FOR WAVEFRONT MEASUREMENT OF AN OPTICAL  
IMAGING SYSTEM BY MEANS OF PHASE-SHIFTING INTERFEROMETRY**

**SUBMISSION OF PRIORITY DOCUMENT**

Commissioner for Patents  
P.O. Box 1450  
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

Submitted herewith is a certified copy of the priority document on which a claim to  
priority was made under 35 U.S.C. § 119. The Examiner is respectfully requested to  
acknowledge receipt of said priority document.

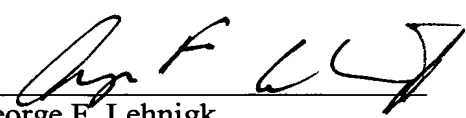
Respectfully submitted,

SUGHRUE MION, PLLC  
Telephone: (202) 293-7060  
Facsimile: (202) 293-7860

WASHINGTON OFFICE

**23373**

CUSTOMER NUMBER

  
George F. Lehnigk  
Registration No. 36,359

Enclosures: GERMANY 103 16 123.6

Date: September 17, 2004

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Inventor: Helmut HAIDNER, et al.  
Application No.: 10/816,896  
Group Art Unit: 2877  
Filing Date: April 2, 2004  
SUGHRUE Reference No.: Q80898  
SUGHRUE Telephone No.: 202-293-7060

## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 103 16 123.6

**Anmeldetag:** 4. April 2003

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

**Bezeichnung:** Vorrichtung und Verfahren zur Wellenfront-  
vermessung eines optischen Abbildungssystems  
durch phasenschiebende Interferometrie

**IPC:** G 01 J 9/04

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 26. März 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT

Anmelder:

Carl Zeiss SMT AG  
Carl-Zeiss-Str. 22  
  
73447 Oberkochen

Unser Zeichen: P 42108 DE

28.03.2003 EW/wi

Vorrichtung und Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen  
Abbildungssystems durch phasenschiebende Interferometrie

- 5 Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur Wellenfrontvermes-  
sung eines optischen Abbildungssystems durch eine phasenschiebende  
Interferometrietechnik mit einer objektseitig anzuordnenden Masken-  
struktur und einer bildseitig anzuordnenden Gitterstruktur und auf ein  
Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen Abbildungssys-  
10 tems durch eine phasenschiebende Interferometrietechnik, bei dem eine  
phasenschiebende Struktur und ein Detektorelement lateral relativ zum  
zu vermessenden optischen Abbildungssystem bewegt werden.

- Vorrichtungen und Verfahren dieser Art dienen beispielsweise dazu, die  
15 Abbildungsqualität bzw. Bildfehler höchstauflösender optischer Abbil-  
dungssysteme interferometrisch mit hoher Präzision zu bestimmen. Ein  
wichtiges Anwendungsgebiet ist die entsprechende Vermessung von  
Projektionsobjektiven in Mikrolithographie-Belichtungsanlagen zur Halb-  
leiterbauelementstrukturierung. Zu diesem Zweck gebräuchliche Interfe-  
20 rometrietechniken sind die Scher- bzw. Shearinginterferometrie, mit der  
z.B. die in der Offenlegungsschrift DE 101 09 929 A1 offenbarte Wellen-  
frontvermessungsvorrichtung arbeitet, und die Punktbeugungsinterfero-

metrie bzw. Point-Diffraction-Interferometrie. Dabei kann die Vorrichtung in das System integriert sein, in welchem das Abbildungssystem in seinem normalen Betrieb verwendet wird, und sie kann zur Vermessung die gleiche Strahlung einer im System vorhandenen Strahlungsquelle nutzen, wie sie im normalen Betrieb des Abbildungssystems verwendet wird. In diesem Fall wird das Interferometer als Betriebsinterferometer- bzw. BIF-Vorrichtung bezeichnet.

Bekanntermaßen wird bei diesen phasenschiebenden Interferometrie-techniken zur Wellenfrontvermessung die phasenschiebende Struktur, z.B. ein bildseitig anzuordnendes Beugungsgitter mit ein- oder zweidimensionaler Beugungsgitterstruktur oder eine objektseitig anzuordnende, sogenannte Kohärenzmaske mit ein- oder zweidimensionaler Kohärenzmaskenstruktur, lateral relativ zum zu vermessenden optischen Abbildungssystem bewegt, um die Ortsableitung der gemessenen Wellenfront in der betreffenden Lateralrichtung zu ermitteln, woraus sich dann Bildfehlerinformationen über das Abbildungssystem, insbesondere orts aufgelöste Aberrationsinformationen über die gesamte Pupille des Abbildungssystems hinweg gewinnen lassen, typischerweise in Form der sogenannten Zernike-Koeffizienten. Mit der Bezeichnung „ein- oder zweidimensional“ sind hierbei vorliegend solche Strukturen gemeint, die in einer bzw. in zwei nicht-parallelen Richtungen periodisch sind und dementsprechend im Beugungsdiagramm zu Beugungsmustern in einer bzw. in zwei nicht-parallelen Richtungen führen.

25

Dazu werden beispielsweise die Ortsableitungen in zwei zueinander orthogonalen Richtungen, wie der x- und y-Richtung eines xyz-Koordinatensystems mit in Richtung der optischen Achse des Systems weisender z-Achse, unter Verwendung einer objektseitig anzuordnenden, zweidimensionalen Kohärenzmaske und einer dazu korrespondierenden, zweidimensionalen Beugungsgitterstruktur bestimmt. Zusätzlich zu der stufenweisen, relativ langsamen Lateralverschiebung z.B. der Beu-

30

gungsgitterstruktur zwecks Bewirkung der Phasenschiebung in der Richtung, in der die Ortsableitung des Interferogramms bzw. der Wellenfront gemessen werden soll, z.B. in x-Richtung, ist bevorzugt eine dagegen viel schnellere Lateralbewegung der phasenschiebenden Struktur in der dazu senkrechten Richtung, wie der y-Richtung, vorgesehen, um Effekte durch Interferenzen zwischen unerwünschten Beugungsordnungen in dieser orthogonalen Richtung zu unterdrücken. Das vom Detektorelement auf der Detektionsebene während dieser schnellen Bewegung aufgenommene Interferogrammbild wird aufintegriert, so dass sich die unerwünschten Interferenzen weitestgehend herausmitteln.

Häufig wird synchron zur phasenschiebenden Struktur auch der nachgeordnete Detektionsteil und insbesondere das bildaufnehmende Detektorelement lateral verschoben, z.B. realisiert durch einen Aufbau mit bewegungsstarrer Kopplung von phasenschiebender Struktur und Detektorelement. Diese feste Kopplung ermöglicht eine vergleichsweise kompakte Ausführung des wellenfrontvermessenden Interferometerteils. Bei Verwendung der für diesen Zweck konventionellen Verfahren zur Auswertung der Wellenfront-Interferogramme wird jedoch insbesondere für diesen Systemtyp mit bewegungsstarrer Kopplung von phasenschiebender Struktur und Detektorelement eine Limitierung der für die Wellenfrontvermessung erzielbare Genauigkeit beobachtet, die darauf zurückgeführt wird, dass bei der synchronen Lateralbewegung von phasenschiebender Struktur und Detektorelement das Bild der Pupille des zu vermessenden Abbildungssystems während des Messvorgangs in der Detektionsebene des Detektorelements wandert. Dies ist speziell bei Systemen der Fall, die keine sinuskorrigierte Abbildungsoptik zwischen der phasenschiebenden Struktur und dem Detektorelement verwenden, und gilt sowohl für die erwähnte langsame Lateralbewegung in der zu messenden Richtung als auch für die schnelle Bewegung in der dazu orthogonalen Richtung zur Unterdrückung der unerwünschten Interferenzen. Die Pupillenwanderung tritt auch auf, wenn die objektseitige

Maskenstruktur lateral verschoben wird, während das Detektorelement unverschoben bleibt, und führt mit den herkömmlichen Auswertemethoden zu einer räumlichen „Verwaschung“ der gemessenen Wellenfronten und dadurch zu einem sogenannten „Übersprechen“ zwischen verschiedenen Zernike-Koeffizienten, insbesondere werden Zernike-Koeffizienten mit großen radialen Potenzen untergewichtet.

Der Erfindung liegt als technisches Problem die Bereitstellung einer Vorrichtung und eines Verfahrens der eingangs genannten Art zugrunde, die eine vergleichsweise genaue Wellenfrontvermessung eines optischen Abbildungssystems speziell auch dann ermöglichen, wenn durch eine gekoppelte Lateralbewegung von phasenschiebender Struktur und Detektorelement oder eine Lateralbewegung einer objektseitigen Maske relativ zum Detektorelement das Pupillenbild des vermessenen Abbildungssystems auf der Detektionsebene des Detektorelements wandert.

Die Erfindung löst dieses Problem durch die Bereitstellung einer Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und eines Verfahrens mit den Merkmalen des Anspruchs 2.

20

Die Vorrichtung nach Anspruch 1 zeichnet sich dadurch aus, dass für die objektseitig anzuordnende Maskenstruktur einerseits und die bildseitig anzuordnende Gitterstruktur andererseits jeweils ein oder mehrere Strukturmuster unterschiedlicher Dimensionalität gewählt sind, d.h. für die objektseitige Maskenstruktur ein oder mehrere eindimensionale Maskenstrukturmuster und für die bildseitige Gitterstruktur ein oder mehrere zweidimensionale Gitterstrukturmuster oder umgekehrt für die Maskenstruktur ein oder mehrere zweidimensionale Maskenstrukturmuster und für die Gitterstruktur ein oder mehrere eindimensionale Gitterstrukturmuster. Dies hat die Wirkung, dass unerwünschte Interferenzen in einer zur Messrichtung nicht-parallelen, z.B. orthogonalen Richtung, die meist den größten Anteil am Zernike-Übersprechen haben, aus Geomet-

30

riegründen durch die Beschränkung der Maskenstruktur oder der Gitterstruktur auf ein oder mehrere eindimensionale Strukturmuster weitestgehend unterdrückt werden. Diese Maßnahme kann folglich die herkömmliche schnelle Phasenschiebung in dieser nicht-parallelen Richtung ersetzen.

Das Wellenfrontvermessungsverfahren nach Anspruch 2 beinhaltet eine rechnerische Berücksichtigung des Pupillenlageversatzes durch Rückrechnen des vom Detektorelement jeweils erfassten Interferogramms anhand einer zu der phasenschiebenden Lateralbewegung gehörigen Phasenschiebekennlinie oder durch eine rechnerische Korrektur von aus den erfassten Interferogrammen erhaltenen Wellenfrontableitungen in der Lateralbewegungsrichtung. Durch dieses Herausrechnen des durch den Pupillenlageversatz bedingten Messfehlers wird eine hohe Messgenauigkeit der Bildfehlerermittlung durch die Wellenfrontvermessung auch bei Wanderungsbewegungen der Pupillenlage auf der Detektionsebene erzielt.

In einer spezifischen Ausgestaltung dieser Vorgehensweise erfolgt die pupillenlageabhängige rechnerische Korrektur der Wellenfrontableitungen mittels eines relativ einfach anwendbaren Näherungsalgorithmus, mit dem der Einfluss des Pupillenlageversatzes jedenfalls für die langsame Phasenschiebebewegung in Messrichtung ausreichend berücksichtigt bzw. kompensiert werden kann.

25

Der Störeinfluss in nicht-paralleler Richtung kann z.B. in Ausgestaltung der Erfindung dadurch ausreichend unterdrückt werden, dass das erfindungsgemäße Verfahren mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung durchgeführt wird. Die auf eine Dimension beschränkte Masken- oder phasenschiebende Gitterstruktur der Vorrichtung macht, wie oben erwähnt, eine schnelle Phasenschiebebewegung in nicht-paralleler Richtung überflüssig, so dass auch kein entsprechender Kompensationsbe-

30

darf eines Pupillenlageversatzes in dieser Richtung entsteht. Alternativ kann der Pupillenlageversatz für die schnelle Phasenschiebebewegung in nicht-paralleler Richtung durch das Rückrechnen des erfassten Interferogramms anhand der zugehörigen Phasenschiebekennlinie kompensiert werden.

Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden nachfolgend beschrieben. Hierbei zeigen:

10 Fig. 1 eine schematische Seitenansicht einer Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung durch Scherinterferometrie,

Fig. 2 eine Perspektivansicht eines Phasenschiebe- und Detektionsteils der Vorrichtung von Fig. 1,

15

Fig. 3 schematische Draufsichten auf eine Detektionsebene des Phasenschiebe- und Detektionsteils von Fig. 2 während stufenweisen Phasenschiebebewegungen in zwei orthogonalen Richtungen,

20

Fig. 4 eine schematische Darstellung der Pupillenbild-Wanderungsbewegung für die xy-Phasenschiebebewegungen von Fig. 3,

25

Fig. 5 eine schematische Draufsicht auf ein in der Vorrichtung von Fig. 1 als phasenschiebende Struktur verwendbares Schachbrett-Beugungsgitter,

30

Fig. 6 und 7 Draufsichten auf zwei in Verbindung mit dem Schachbrett-Beugungsgitter von Fig. 5 in der Vorrichtung von Fig. 1 verwendbare Liniengitter-Kohärenzmaskenstrukturen für die x- bzw. y-Richtung,



Fig. 8 eine schematische Darstellung des Zusammenwirkens des zweidimensionalen Schachbrett-Beugungsgitters von Fig. 5 mit dem eindimensionalen Kohärenzmasken-Liniengitter von Fig. 6,

5

Fig. 9 eine schematische Draufsicht auf ein zweidimensionales Dreiecks-Beugungsgitter und auf drei lageentsprechend angeordnete, eindimensionale Kohärenzmasken-Liniengitter zur Verwendung in der Vorrichtung von Fig. 1,

10

Fig. 10 eine schematische Darstellung entsprechend Fig. 8 für das zweidimensionale Dreiecks-Beugungsgitter und eines der drei zugehörigen Kohärenzmasken-Liniengitter von Fig. 9,

15 Fig. 11 ein Kennliniendiagramm zur Veranschaulichung des Einflusses des Pupillenlageversatzes auf Messvorgänge mit der Vorrichtung von Fig. 1 für den Zernike-Koeffizienten Z9 und

Fig. 12 ein Kennliniendiagramm zur Veranschaulichung einer rechnerischen Korrektur des Einflusses des Pupillenlageversatzes bei Messvorgängen mit der Vorrichtung von Fig. 1 für den Zernike-Koeffizienten Z25.

20

Fig. 1 veranschaulicht einen typischen Aufbau einer Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung durch Shearinginterferometrie zur Bildfehler- und insbesondere Aberrationsermittlung am Beispiel eines Projektionsobjektivs 1 einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage als zu vermessendes optisches Abbildungssystem. Das Objektiv 1 ist vereinfacht durch eine objektseitige Linse 1a, eine Objektivpupille 1b und eine bildseitige Linse 1c repräsentiert. Eine Kohärenzmaske 6 ist objektseitig, vorzugsweise in der Objektebene des Objektivs 1, angeordnet. Dazu korrespondierend ist bildseitig, vorzugsweise in der Bildebene des

25

30

Objektivs 1, ein phasenschiebendes Beugungsgitter 7 lateral in der zur z-Richtung der optischen Achse des Systems orthogonalen xy-Ebene beweglich angeordnet. Die verzerrte Pupille des Objektes 1 wird auf ein Detektorelement 2 abgebildet, genauer gesagt auf eine Detektionsebene 5 desselben. An das Detektorelement 2, bei dem es sich z.B. um einen CCD-Detektor einer Bildaufnahmekamera handeln kann, ist eine Auswerteeinheit 3 angekoppelt, in der die Bildverarbeitungs- und Auswertelgorithmen implementiert sind, wie sie bekanntermaßen zur Bildfehlerermittlung durch Auswertung der vom Detektorelement 2 aufgenommenen Wellenfront-Interferogramme benötigt werden.

Das Detektorelement 2 ist im Beispiel von Fig. 1 mit dem phasenschiebenden Beugungsgitter 7 bewegungsstarr in Form einer gemeinsamen Phasenschiebe- und Detektorbaueinheit 8 gekoppelt

15

Die in Fig. 1 mit einem Bewegungspfeil B symbolisierte Lateralbewegung des Beugungsgitters 7 dient der stufenweisen Phasenschiebung für die Shearinginterferometriemessung, wodurch aus den sukzessiv aufgenommenen Interferogrammen die Ortsableitung der Wellenfront in der betreffenden Lateralrichtung und daraus die Bildfehler des vermessenen Objektivs 1 ermittelt werden können, wie dies an sich bekannt ist und hier keiner näheren Erläuterung bedarf. Durch das gekoppelte Mitverschieben des Detektorelements 2 mit dem phasenschiebenden Beugungsgitter 7 ergibt sich ein Versatz des Pupillenbildes, d.h. eine entsprechende laterale Wanderungsbewegung desselben, auf der Detektionsebene 5. Dies ist in den Fig. 2 bis 4 genauer dargestellt. Fig. 2 zeigt schematisch die Phasenschiebe- und Detektionsbaugruppe 8 mit einem zweidimensionalen Schachbrett-Beugungsgitter 7a während eines Messvorgangs. Vom zu vermessenden Objektiv kommende Messstrahlung 9 wird vom Schachbrett-Beugungsgitter 7a in x- und y-Richtung gebeugt, wobei das jeweilige Beugungsmaximum einem zugehörigen Pu-

30

pupillenbildfleck 10 auf der Detektionsebene 5 entspricht. Der Einfachheit halber ist in Fig. 2 nur das nullte Beugungsmaximum dargestellt.

Fig. 3 veranschaulicht in einer oberen Reihe aus vier Draufsichten auf die Detektionsebene 5 in unterschiedlichen y-Stellungen der Phasenschiebe- und Detektionsbaugruppe 8 und in einer unteren Reihe von vier solchen Einzelbildern bei verschiedenen x-Stellungen dieser Baugruppe 8 die Wanderungsbewegung des Pupillenbildflecks 10 auf der Detektionsfläche 5 aufgrund der phasenschiebenden Lateralbewegung des Beugungsgitters 7 und damit auch des mit ihm gekoppelten Detektorelements 2.

Fig. 4 zeigt schematisch diesen Pupillenbildversatz zwischen einer Mitlenstellung  $10_0$  des Pupillenbildflecks und je einer in die positive x-Richtung verschobenen Stellung  $10_{+dx}$  und in die positive y-Richtung verschobenen Stellung  $10_{+dy}$ .

Der Pupillenbildversatz in x-Richtung tritt z.B. auf, wenn das Beugungsgitter 7 schrittweise in diese Richtung verschoben wird, um die Phasenschiebung in diese Richtung zu bewirken und dadurch die Ortsableitung der Wellenfront in x-Richtung zu bestimmen. Dieser Bewegung wird oftmals, wie an sich bekannt, eine demgegenüber schnelle Bewegung des Beugungsgitters 7 und damit auch der Detektionsebene 5 in der dazu orthogonalen Richtung, d.h. in diesem Fall der y-Richtung, überlagert, mit der Beugungsordnungen herausgemittelt und damit unterdrückt werden, die auch in dieser Richtung bei einer angenommenen Zweidimensionalität von Beugungsgitter 7 und Kohärenzmaske 6 auftreten, bei der Ermittlung der Wellenfront-Ortsableitungen in x-Richtung aber unerwünscht sind. Umgekehrt wird bei Vermessung in y-Richtung die schrittweise, vergleichsweise langsame Bewegung in y-Richtung von einer schnellen Bewegung in x-Richtung überlagert, um die in diesem Fall störenden Beugungsordnungen in x-Richtung zu unterdrücken.

Der durch die erwähnten Lateralbewegungen von Beugungsgitter 7 und Detektorelement 5 relativ zum zu vermessenden Abbildungssystem 1 in der xy-Ebene auftretende Pupillenversatz liefert einen entsprechenden Fehlerbeitrag bei der Auswertung der aufgenommenen Shearing-Interferogramme für die Wellenfront- und damit Bildfehlerbestimmung. Gleiches gilt nicht nur für die hier beispielhaft gezeigte Shearing-interferometrietechnik, sondern auch für alle anderen herkömmlichen Interferometrietechniken, bei denen zur Wellenfrontvermessung eines Abbildungssystems eine Lateralbewegung einer phasenschiebenden Struktur, insbesondere einer Beugungsgitterstruktur, und einer damit gekoppelten Detektionsebene zur Phasenschiebung vorgenommen werden, wie z.B. bei der Punktbeugungsinterferometrie. Ein Pupillenversatz tritt auch in Systemen auf, bei denen die Phasenschiebung durch eine Lateralbewegung der objektseitigen Maskenstruktur, wie der Kohärenzmaskenstruktur 6 von Fig. 1, relativ zur Detektionsebene bewirkt wird. Solche Systeme und zugehörige Vermessungsverfahren, bei denen die objektseitige Maskenstruktur als phasenschiebende Struktur fungiert, sind folglich ebenfalls Gegenstand der Erfindung. Nur der Einfachheit halber wird im Folgenden die Erfindung weiter anhand des Beispiels mit dem bildseitigen Beugungsgitter 7 als phasenschiebender Struktur erläutert.

Der Fehlerbeitrag äußert sich typischerweise im sogenannten Übersprechen von Zernike-Koeffizienten. Eine durch bestimmte Zernike-Koeffizienten beschriebene Wellenfront koppelt durch den Pupillenbildversatz mit anderen, zumeist niedrigeren Zernike-Koeffizienten.

Die Erfindung berücksichtigt diesen Fehlerbeitrag bei der Bildfehlerbestimmung, indem sie ihn durch geschickte Wahl der objektseitig anzuordnenden Maskenstruktur und der bildseitig anzuordnenden Gitterstruktur weitestgehend vermeidet und/oder rechnerisch weitestgehend kom-

pensiert. Auf diese den Pupillenversatzfehler weitestgehend vermeidenden bzw. rechnerisch kompensierenden Maßnahmen wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig. 5 bis 12 näher eingegangen.

- 5 Eine erste Abhilfemaßnahme besteht darin, für die objektseitig anzuordnende Maskenstruktur, im Beispiel von Fig. 1 die Kohärenzmaskenstruktur 6, einerseits und die bildseitige Gitterstruktur, in der Vorrichtung von Fig. 1 die Beugungsgitterstruktur 7, andererseits unterschiedliche Dimensionalität zu wählen, d.h. für das eine Element eine eindimensionale
- 10 periodische Struktur und für das andere Element eine zweidimensionale periodische Struktur, statt wie herkömmlich eine zweidimensionale Struktur für beide Elemente. Die Fig. 5 bis 8 zeigen hierzu ein Beispiel, bei dem als Beugungsgitter 7 das zweidimensionale Schachbrett-Beugungsgitter 7a gemäß Fig. 2 gewählt ist, wie in Fig. 5 veranschaulicht,
- 15 während für die Kohärenzmaske 6 wahlweise je eine eindimensionale Liniengitter-Maskenstruktur 6a, 6b eingesetzt wird, wie in den Fig. 6 und 7 dargestellt. Die beiden Liniengitter-Maskenstrukturen 6a, 6b werden hierbei, wie in den Fig. 6 und 7 bezogen auf die Beugungsgitterdarstellung von Fig. 5 lagerichtig wiedergegeben, mit zueinander orthogonalen
- 20 Periodizitätsrichtungen eingesetzt, die jeweils parallel zu einer der beiden orthogonalen Schachbrett-Periodizitätsrichtungen des Schachbrett-Beugungsgitters 7a sind. Speziell sind die Liniengittermaske 6a von Fig. 6 mit Periodizitätsrichtung in x-Richtung und die Liniengittermaske 6b von Fig. 7 mit Periodizitätsrichtung in y-Richtung objektseitig in der Vor-
- 25 richtung von Fig. 1 anzuordnen.

Fig. 8 zeigt die Wirkung dieser Maßnahme unterschiedlicher Dimensionalität von phasenschiebender Struktur und wellenfronterzeugender Kohärenzmaskenstruktur am Beispiel des Schachbrett-Beugungsgitters 7a von Fig. 5 in Kombination mit dem Kohärenzmasken-Liniengitter 6a von Fig. 6. Letzteres führt, wie in Fig. 8 diagrammatisch veranschaulicht, zu einer in x-Richtung modulierten Intensitäts-Kohärenzfunktion, während

das Schachbrett-Beugungsgitter 7a, wie ebenfalls in Fig. 8 diagrammatisch veranschaulicht, Beugungsmaxima sowohl entlang der x-Achse als auch entlang der y-Achse des Beugungsdiagramms liefert. In Kombination beider periodischer Strukturen mit ein- bzw. zweidimensionaler Periodizität ergeben sich verbleibende interferenzfähige Beugungsordnungen in der x-Richtung, wie im untersten Teilbild von Fig. 8 veranschaulicht. Die Beugungsordnungen in y-Richtung sind unterdrückt.

Die Anordnung von Fig. 8 eignet sich folglich zur interferometrischen Vermessung mit Phasenschiebung entlang der x-Richtung, die in diesem Fall eventuell störenden Beugungsordnungen des Schachbrett-Beugungsgitters 7a in y-Richtung sind unterdrückt. Eine schnelle, ausmittelnde Bewegung des Schachbrett-Beugungsgitters 7a in y-Richtung ist daher nicht erforderlich. In gleicher Weise kann die Wellenfrontvermessung durch Phasenschiebung in y-Richtung unter Einsatz des Kohärenzmasken-Liniengitters 6b von Fig. 7 statt des Liniengitters 6a von Fig. 6 erfolgen, wobei dann störende Beugungsordnungen in x-Richtung unterdrückt werden.

Da durch diese geometrische Strukturmaßnahme die schnelle, ausmittelnde Lateralbewegung der phasenschiebenden Struktur in der zur Messrichtung nicht-parallelen Richtung entfällt, tritt auch kein dadurch verursachter Pupillenbildversatz in diese Richtung und damit kein entsprechender Fehlerbeitrag auf. Der sich durch die schrittweise Phasenschiebebewegung in Messrichtung ergebende Pupillenbildversatz-Fehlerbeitrag kann bei Bedarf rechnerisch korrigiert werden, worauf weiter unten näher eingegangen wird.

Statt des zweizähligen Schachbrettgitters 7a kann je nach Bedarf eine andere zweidimensionale Gitterstruktur mit n-zähliger Geometrie verwendet werden, wobei durch Benutzung einer eindimensionalen Kohärenzmaske jeweils Interferenzen unerwünschter Beugungsordnungen

unterdrückt werden können. Die Fig. 9 und 10 zeigen als weiteres solches Beispiel ein Dreiecks-Beugungsgitter 7b als phasenschiebende Gitterstruktur, was z.B. bei einer hexagonalen Parzellierung der Pupille des zu vermessenden Objektivs bei der Bestimmung der Ortsableitungen in den drei Scherrichtungen dieser dreizähligen Dreiecksgitterstruktur 7b zu einer Genauigkeitssteigerung der Wellenfrontvermessung führen kann.

Wie in Fig. 9 weiter gezeigt, wird das Dreiecks-Beugungsgitter 7b wahlweise mit je einem eindimensionalen Kohärenzmasken-Liniengitter 6c, 6d, 6e kombiniert, die so orientiert sind, dass ihre Periodizitätsrichtung mit je einer der drei um  $120^\circ$  gegeneinander geneigten Periodizitätsrichtungen des Dreiecksgitters 7b zusammenfällt. Durch den Einsatz je eines der drei Liniengitter 6c, 6d, 6e als Kohärenzmaske werden folglich die Beugungsordnungen des phasenschiebenden Dreiecksgitters 7b in der betreffenden Periodizitätsrichtung herausgefiltert, während die Beugungsordnungen in den beiden anderen Periodizitätsrichtungen unterdrückt werden. In der gezeigten Orientierung von Fig. 9 liegt eine der drei Dreiecksgitter-Periodizitätsrichtungen in der y-Richtung, und dies entspricht der Periodizitätsrichtung eines ersten Kohärenzmasken-Liniengitters 6c, während die Periodizitätsrichtungen der beiden anderen Kohärenzmasken-Liniengitter 6d, 6e dazu in einem Winkel von  $+120^\circ$  bzw.  $-120^\circ$  liegen.

Fig. 10 veranschaulicht den Einsatz eines der Liniengitter 6d als Kohärenzmaske in Kombination mit dem Dreiecksgitter 7b als phasenschiebende Struktur. Analog zum oben beschriebenen Beispiel von Fig. 8 veranschaulicht Fig. 10 die Selektion der interferenzfähigen Beugungsordnungen durch das betreffende Liniengitter 6d mit seiner in der zugehörigen Periodizitätsrichtung intensitätsmodulierten Kohärenzfunktion aus den in den drei Periodizitätsrichtungen liegenden Beugungsordnungen des Dreiecksgitters 7b. Damit lassen sich wiederum die Wellen-

frontableitungen in der betreffenden Messrichtung bestimmen und gleichzeitig störende Interferenzen von Beugungsordnungen der beiden anderen Periodizitätsrichtungen des Dreiecksgitters 7b unterdrücken, ohne dass dazu eine rasche, ausmittelnde Lateralbewegung des Dreiecksgitters 7b in diesen Richtungen zusätzlich zur schrittweisen Phasenschiebebewegung in der Messrichtung erforderlich ist.

Wie oben erläutert, kann somit durch die Kombination einer zweidimensionalen, bildseitig anzuordnenden Gitterstruktur mit einer eindimensionalen, objektseitig anzuordnenden, wellenfronterzeugenden Struktur auf die ausmittelnde, schnelle Verschiebebewegung verzichtet werden, die ansonsten den größten Anteil zum Zernike-Übersprechen beiträgt. Es versteht sich, dass der gleiche Effekt in alternativen Ausführungsformen der Erfindung dadurch erzielt werden kann, dass eine zweidimensionale, objektseitige, wellenfronterzeugende Maskenstruktur mit einer eindimensionalen bildseitigen Gitterstruktur kombiniert wird. Weiter versteht sich, dass in an sich herkömmlicher Art die Kohärenzmaske und/oder die bildseitige Gitterstruktur jeweils mehrere, z.B. nebeneinander oder sich überlagernd angeordnete, ein- oder zweidimensionale Muster beinhalten können.

Alternativ oder zusätzlich zu dieser geometrischen Strukturmaßnahme kann eine rechnerische Korrektur des Fehlerbeitrags vorgesehen sein, der aus dem Versatz der Pupillenlage in der Detektionsebene durch die gekoppelte Lateralbewegung von phasenschiebender Struktur und Detektionsebene oder der lateralen Relativbewegung von objektseitiger Maske und Detektionsebene resultiert.

Für die rechnerische Korrektur dieses Fehlerbeitrags kommen vor allem folgende zwei Verfahren in Betracht. In einer ersten Variante wird die vom Pupillenbildversatz bedingte Verschiebung der einzelnen, vom Detektorelement erfassten Interferogramme zurückgerechnet, d.h. es wird



die Pupille des vermessenen Abbildungssystems zurückgerechnet. Dies ist durch einen geeigneten herkömmlichen Korrekturalgorithmus ohne weiteres möglich, wenn ihm als Eingangsinformation die zugehörige Phasenschiebekennlinie zugeführt wird. Letztere ist aber zur Bewirkung der schrittweisen phasenschiebenden Lateralbewegungen vorgegeben und damit bekannt. Mit diesem rechnerischen Korrekturverfahren kann sowohl der Fehlerbeitrag aufgrund der schrittweisen, langsamen Lateralbewegung zur Phasenverschiebung in der Messrichtung als auch jeglicher Fehlerbeitrag aufgrund einer ausmittelnden, schnellen Lateralbewegung in einer zur Messrichtung nicht-parallelen Richtung kompensiert werden. Voraussetzung für die Anwendung dieses Korrekturverfahrens ist die Verwendung eines Detektorelements mit sehr hoher Auflösung oder eine Interpolation der einzelnen aufgenommenen Interferogramme, da die Lateralverschiebung nicht notwendigerweise ein ganzzahliges Vielfaches eines Detektionsebenen-Pixels des Detektorelements beträgt.

Als weitere Variante ist speziell zur Kompensation des Fehlerbeitrags aufgrund der langsamen, schrittweisen Phasenschiebebewegung ein rechnerisches Korrekturverfahren einsetzbar, bei dem die gemessenen Ortsableitungen der Wellenfront in der jeweiligen Messrichtung pixelweise unter Verwendung eines relativ einfach auszuführenden Algorithmus korrigiert werden, bei dem es sich um einen für den gewünschten Zweck vollkommen ausreichenden Näherungsalgorithmus handelt.

Zunächst veranschaulicht Fig. 11 die Notwendigkeit bzw. Zweckmäßigkeit einer Korrektur des durch die langsame Phasenschiebebewegung verursachten Fehlerbeitrags diagrammatisch am Beispiel des Einflusses auf die Ableitung der Wellenfront für den Zernike-Koeffizienten Z9. Die mit den Kreuzsymbolen markierte Kennlinie „Original“ bezeichnet die ohne Mitbewegung der Detektionsebene mit der phasenschiebenden Struktur gemessene Wellenfrontableitung des Zernike-Koeffizienten Z9

(als Schnitt durch Z9), während im Vergleich dazu die mit den Kreis-  
symbolen markierte Kennlinie „Ergebnis der Phasenschiebung“ die  
durch die Mitbewegung erhaltene Wellenfrontableitung bezeichnet. Letz-  
tere eilt der „Original“-Kennlinie ersichtlich voraus. Es resultiert ein Ü-  
5 bersprechen des Zernike-Koeffizienten Z9 in die Zernike-Koeffizienten  
Z5 und Z6 sowie Z2 und Z3 für die aus der x- bzw. y-Ableitung rekon-  
struierte Wellenfront.

Das speziell zur Kompensation des Fehlerbeitrags aus der langsamen  
10 Phasenschiebebewegung nützliche rechnerische Korrekturverfahren  
geht von folgender Beziehung (I) der Intensitätsmodulation  $I^{(1)}$  als Funk-  
tion der n-ten Phasenschiebung, d.h. der zugehörigen „langsamen“  
Phasenkurve, für ein jeweiliges Pixel unter Berücksichtigung der Mitbe-  
wegung der Detektionsebene mit der phasenschiebenden Struktur rela-  
15 tiv zum zu vermessenden Abbildungssystem aus:

$$I^{(1)}(n) = \cos\left(S_x + \frac{\partial S_x}{\partial x} \frac{\Delta x(n-1)}{N} + \frac{2\pi(n-1)}{N}\right) \quad (I)$$

wobei N die Gesamtzahl der Phasenschritte bezeichnet, eine Phasen-  
20 schiebung über  $2\pi$  erfolgt und  $S_x$  die Ableitung der Wellenfront in x-  
Richtung bezeichnet, die an einem Punkt der Detektionsebene gemes-  
sen wird, wenn keine Mitbewegung der Detektionsebene erfolgt. Die x-  
Richtung ist hierbei ohne Beschränkung der Allgemeinheit als Messrich-  
tung angenommen.  $\Delta x$  bezeichnet die Lateralverschiebung der Detekti-  
25 onsebene während der Phasenschiebung in x-Richtung. Durch Auswer-  
tung der Intensitätswerte  $I^{(1)}$  der einzelnen Pixel über die gesamte Pupil-  
le z.B. mittels Fourier-Transformation lässt sich die Wellenfrontableitung  
 $S_x^{(1)}$  bestimmen, die den Fehlerbeitrag aufgrund der Detektormitbewe-  
gung enthält, der auf den Fehlerterm  $(\partial S_x / \partial x)(\Delta x(n-1)/N)$  zurückgeht.  
30 Eine weitestgehende Kompensation dieses Fehlerbeitrags wird anhand  
der folgenden Beziehung (II) erreicht:

$$I^{(2)}(n) = \cos\left(S_x^{(1)} - \frac{\partial S_x^{(1)}}{\partial x} \frac{\Delta x(n-1)}{N} + \frac{2\pi(n-1)}{N}\right) \quad (II)$$

wobei  $I^{(2)}$  den korrigierten Intensitätswert des einzelnen Pixels als Funktion der  $n$ -ten Phasenschiebung und  $S_x^{(1)}$  die wie oben erläutert durch Auswertung der fehlerbehafteten Intensitätswerte  $I^{(1)}$  erhaltene Wellenfrontableitung darstellt. Aus diesen Intensitätswerten  $I^{(2)}$  wird dann die zugehörige korrigierte Wellenfrontableitung  $S_x^{(2)}$  wiederum z.B. mittels Fourier-Transformation berechnet. Mit anderen Worten wird bei diesem Korrekturalgorithmus die Information, die in der Ableitung von  $S_x^{(1)}$  steckt, zur Korrektur von  $S_x^{(1)}$  genutzt, um die pupillenversatzkorrigierte Wellenfrontableitung  $S_x^{(2)}$  zu ermitteln.

Höhere Ableitungen von  $S_x$  sind in diesem Näherungsalgorithmus vernachlässigt, was ohne Genauigkeitseinbuße gerechtfertigt ist, solange die Verschiebung  $\Delta x$  ein gewisses Maß nicht überschreitet. Für die meisten praktisch wichtigen Fälle ist diese Bedingung erfüllt. Wie erwähnt, eignet sich dieses rechnerische Korrekturverfahren speziell zur Kompensation des Pupillenversatz-Fehlerbeitrags der „langsamen“ Phasenschiebung in Messrichtung. Der oben für die  $x$ -Richtung als Messrichtung angegebene Korrekturalgorithmus ist selbstverständlich in gleicher Weise für alle anderen Messrichtungen anwendbar.

Fig. 12 veranschaulicht die genauigkeitssteigernde Wirkung dieses rechnerischen Korrekturverfahrens am Beispiel der Ableitung des Zernike-Koeffizienten  $Z_{25}$  in  $x$ -Richtung. Die Mitbewegung der Detektionsebene mit der phasenschiebenden Struktur hat ein Übersprechen auf andere Zernike-Koeffizienten zur Folge, so dass analog zur Fig. 11 die Kennlinie „Ergebnis der Phasenschiebung“ mit mitbewegter Detektionsebene von der Kennlinie „Original“ ohne mitbewegte Detektionsebene abweicht. Die mit Dreieckssymbolen markierte Kennlinie „Korrektur“ gibt

das Ergebnis der rechnerischen Korrektur gemäß dem oben erläuterten Korrekturalgorithmus wieder. Ersichtlich ist das Korrekturverfahren in der Lage, den pupillenversatzbedingten Fehlerbeitrag weitestgehend zu kompensieren.

-----

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Wellenfrontvermessung eines optischen Abbildungssystems durch eine phasenschiebende Interferometrieteknik, mit
  - einer objektseitig anzuordnenden Maskenstruktur (6) und
  - einer bildseitig anzuordnenden Gitterstruktur (7),  
dadurch gekennzeichnet, dass
  - die objektseitig anzuordnende Maskenstruktur (6) aus einer oder mehreren eindimensionalen Maskenstrukturmustern (6a bis 6e) und die bildseitig anzuordnende Gitterstruktur aus einer oder mehreren zweidimensionalen Gitterstrukturmustern (7a, 7b) besteht oder die Maskenstruktur aus einer oder mehreren zweidimensionalen Maskenstrukturmustern und die Gitterstruktur aus einer oder mehreren eindimensionalen Gitterstrukturmustern besteht.
2. Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen Abbildungssystems durch eine phasenschiebende Interferometrieteknik, bei dem
  - eine phasenschiebende Struktur (7) und ein Detektorelement (2) lateral relativ zum zu vermessenden optischen Abbildungssystem (1) bewegt werden und/oder eine objektseitige Maskenstruktur (6) lateral relativ zum Detektorelement (2) bewegt wird,  
dadurch gekennzeichnet, dass
  - ein durch die relative Lateralbewegung auftretender Pupillenbildversatz durch pupillenlagekorrigierendes Rückrechnen des vom Detektorelement jeweils erfassten Interferogramms anhand einer zu der Lateralbewegung gehörigen Phasenschiebekennlinie oder durch eine rechnerische Korrektur von aus den erfassten Interferogrammen erhaltenen Wellenfrontableitungen in der Lateralbewegungsrichtung berücksichtigt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, weiter dadurch gekennzeichnet, dass die rechnerische Korrektur von Wellenfrontableitungen in der Lateralbewegungsrichtung unter Verwendung der Beziehung

$$I^{(2)}(n) = \cos\left(S_x^{(1)} - \frac{\partial S_x^{(1)}}{\partial x} \frac{\Delta x(n-1)}{N} + \frac{2\pi(n-1)}{N}\right)$$

erfolgt, welche die Intensitätswerte  $I^{(2)}$  einzelner Detektorelement-Bildpunkte als Funktion der n-ten lateralen Phasenschiebung mit  $S_x^{(1)}$  als fehlerbehafteter Wellenfrontableitung in der Phasenschieberichtung angibt, aus denen dann eine fehlerkorrigierte Wellenfrontableitung ( $S_x^{(2)}$ ) berechnet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, weiter dadurch gekennzeichnet, dass es mit einer Vorrichtung nach Anspruch 1 durchgeführt wird.
-

### Zusammenfassung

1. Vorrichtung und Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen Abbildungssystems durch phasenschiebende Interferometrie.
- 2.1. Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Wellenfrontvermessung eines optischen Abbildungssystems durch eine phasenschiebende Interferometrietechnik mit einer objektseitig anzuordnenden Maskenstruktur (6a) und/oder einer bildseitig anzuordnenden Gitterstruktur (7a).
- 2.2. Erfindungsgemäß besteht die objektseitige Maskenstruktur aus einer oder mehreren eindimensionalen Maskenstrukturmustern und die bildseitige Gitterstruktur aus einer oder mehreren zweidimensionalen Gitterstrukturmustern oder umgekehrt die Maskenstruktur aus einer oder mehreren zweidimensionalen Mustern und die Gitterstruktur aus einer oder mehreren eindimensionalen Mustern. Zusätzlich oder alternativ kann ein Pupillenlageversatz, verursacht durch eine laterale Relativbewegung von Maskenstruktur und Detektorelement, durch Rückrechnen des vom Detektorelement jeweils erfassten Interferogramms anhand einer zugehörigen Phasenschiebekennlinie oder durch eine rechnerische Korrektur von aus den erfassten Interferogrammen erhaltenen Wellenfrontableitungen in der Lateralbewegungsrichtung berücksichtigt werden.
- 2.3. Verwendung z.B. zur Aberrationsbestimmung bei hochauflösenden Projektionsobjektiven von Mikrolithographie-Belichtungsanlagen durch Scher- oder Beugungsinterferometrie.
3. Fig. 8.





Fig. 3

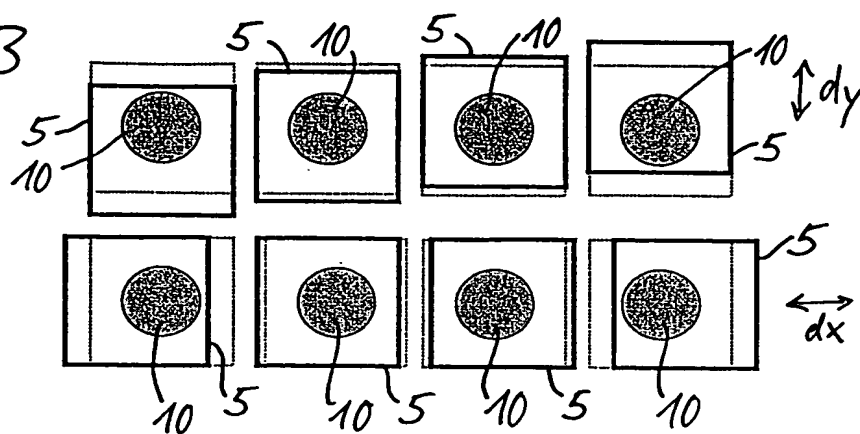


Fig. 4

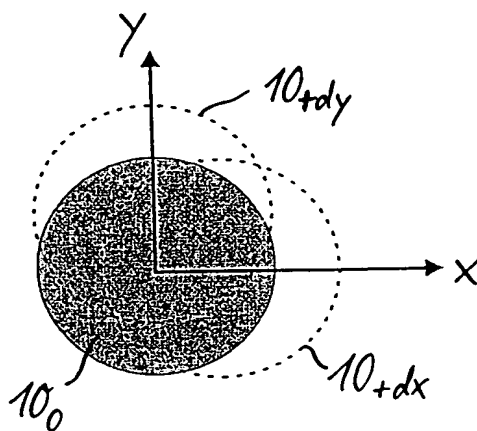
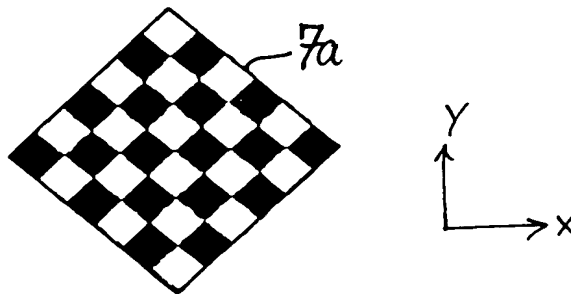
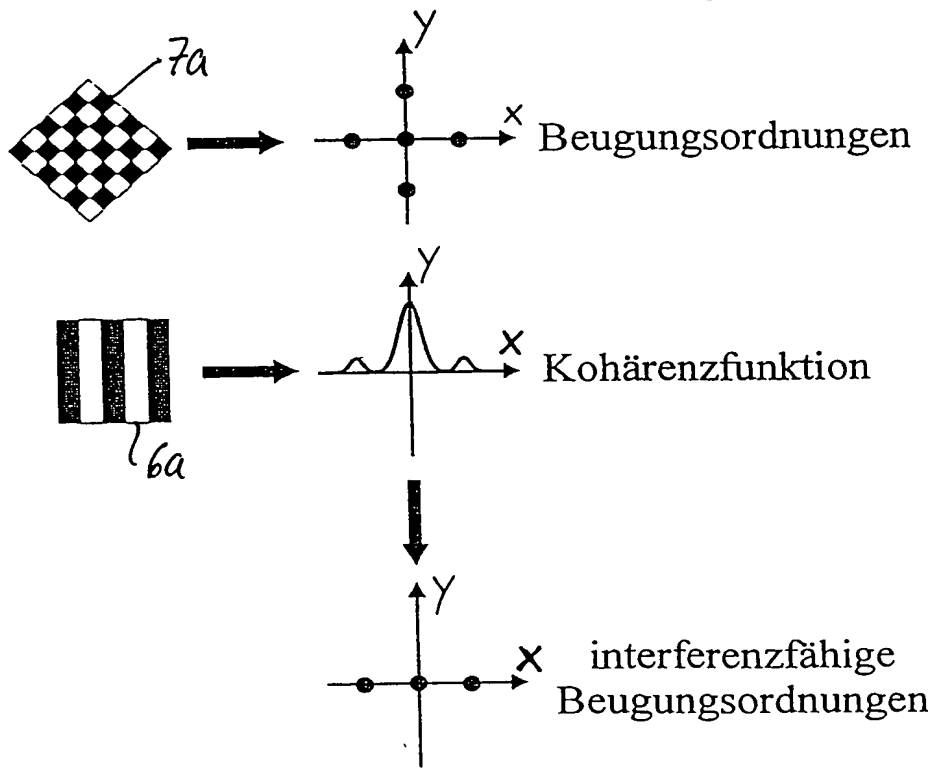
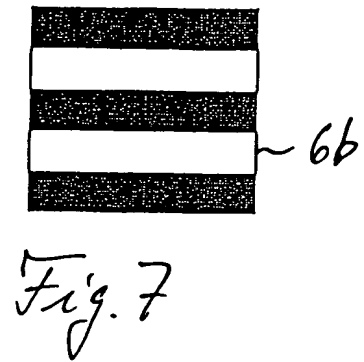
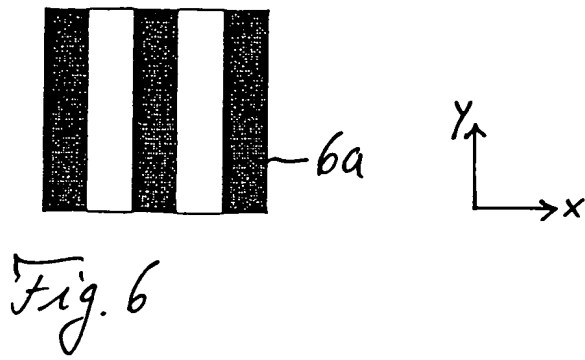


Fig. 5





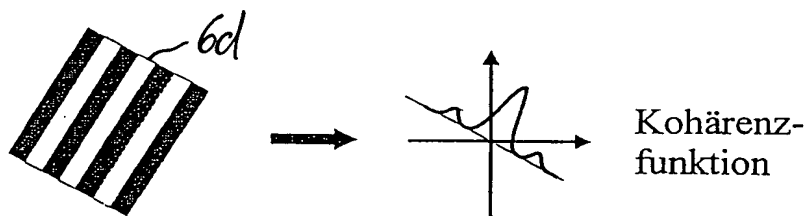
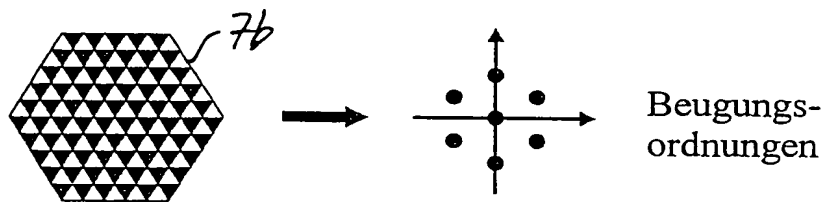
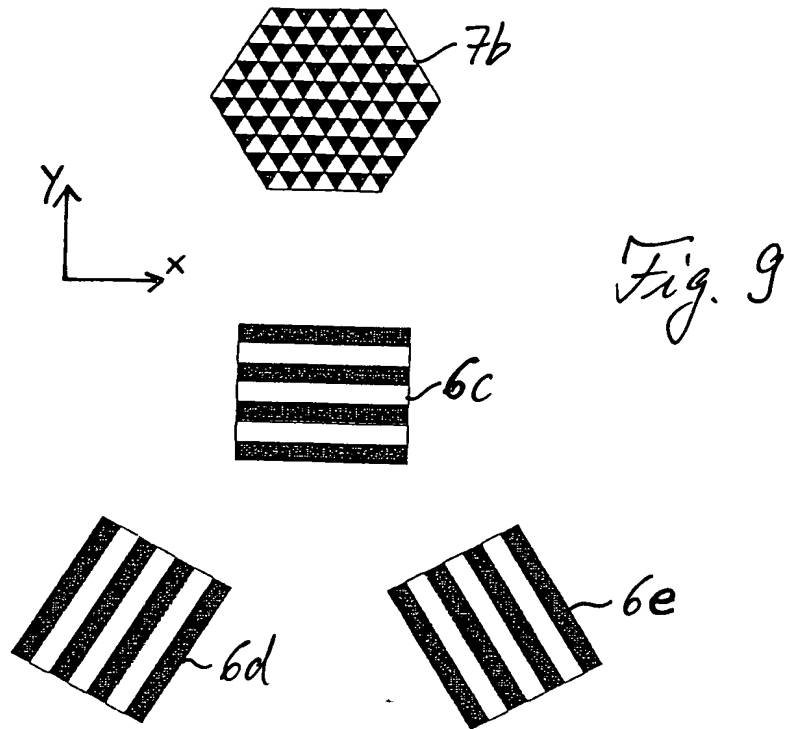
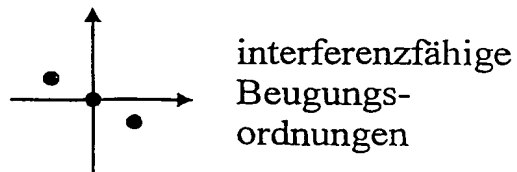


Fig. 10



5/5.

P42108 DE

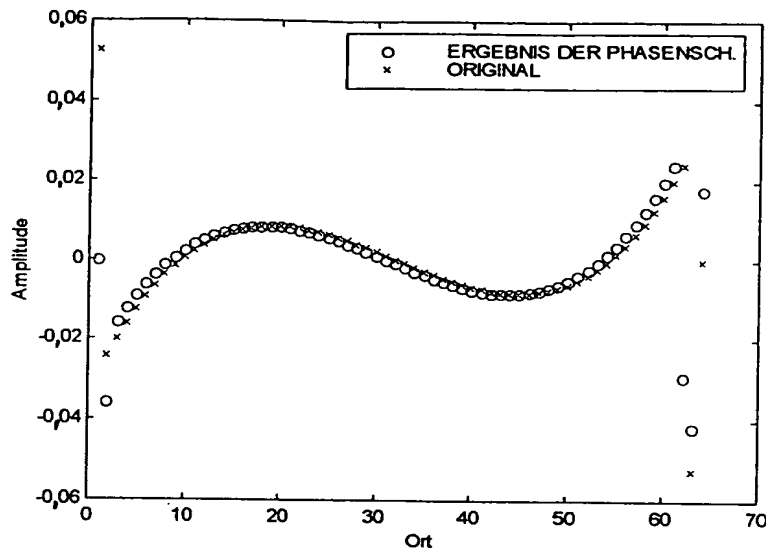


Fig. 11

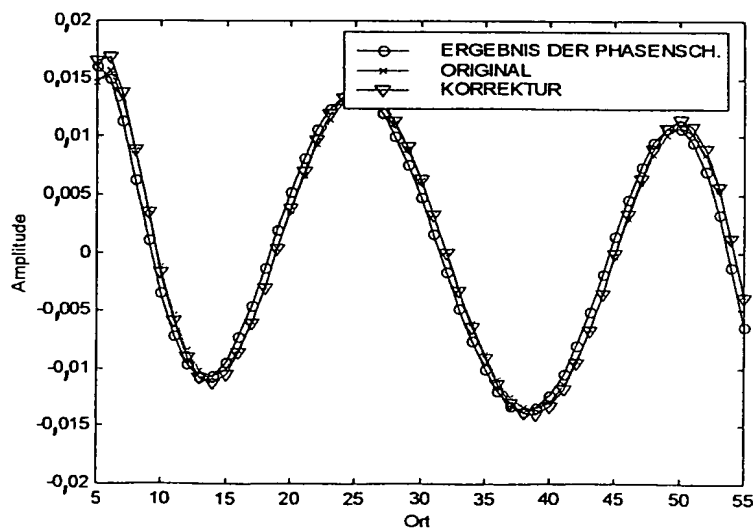


Fig. 12

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**